

平面研削盤の垂直案内面把持機構に関する研究

井上 誠*

A Study on Intermittent Holding Mechanism of Wheel Head in Perpendicular Guideway of Surface Grinder

Makoto INOUE*

Abstract— The perpendicular guideway of surface grinder is required high coupling characteristics and high precise slide motion. The slider mechanism of wheel head by intermittent holding of perpendicular guideway is proposed and studied. The experimental device is made for the model of the perpendicular guideway. The grinding wheel head slider is fixed to the perpendicular guideway during grinding operation by the elongation of PZT actuator and is released during the feed motion in the direction of depth of cut. The characteristics of the static rigidity by the holding force and the repeated motion of holding and releasing are examined experimentally and considered. The results are as follows.

- (1) Increase of pressing force (holding force) causes the increase of static stiffness. The stiffness is able to be calculated with the relations between contraction and pressed force of guideway surface.
- (2) The good response of repeated motion is obtained and the effectiveness of the proposed mechanism is examined.

Key words:perpendicular guideway,slider mechanism,intermittent holding,static rigidity,PZT actuator

1. はじめに

平面研削盤における砥石頭とコラム間の垂直案内運動機構は、滑らかな間欠的切り込み送りと、停止して加工が行われるときの安定な静止状態の維持が要求される。サブミクロンの微少切り込み送りを要求される近年の平面研削盤の垂直すべり案内機構においては、スティックスリップの生じない滑らかな送り機能を主体に考える必要がある。このため、摺動部の面圧を極めて小さくするか、場合によっては隙間を設けるため、摺動部の剛性低下を生じる。なお、静圧案内面の圧力を能動的に制御して、結合特性や運動精度の改善が試みられている¹⁾²⁾が、高価になる事が予想される。

一方、研削作業に着目すると、加工中は切り込み送り駆動を停止する。このとき砥石頭を垂直コラムに能

動的に把持して固定すれば、研削加工時の剛性向上が可能となる。切り込み送りを与えるときのみ把持機能を解除すればよい。一般的に振動抑制の観点からも、静剛性を向上させることは合理的である³⁾。圧電アクチュエータを適用すれば、高速でしかも十分な把持力を得ることができる⁴⁾。幸い、最近の工作機械の垂直方向切り込み送り機構には、電気的なパルスによって駆動されるサーボモータが多用されてきている。この場合、手動、自動を問わず切り込み送りは全て電気的なパルス信号に基づいて作動する。したがって、この信号を基に把持機能を解除して、一定時間の間に切り込み動作を完了させた後、把持機能を復活させることは、原理的に可能である。なお、把持機能を解除して通常の微小な面圧のときのみ切り込み送りを与えるから、摺動部には潤滑油を要しない無給油軸受け材料が適用できる可能性がある。製作上の観点からも単純で廉価な機構となりうる。

そこで本研究では、平面研削盤の垂直摺動部機構を想定した単純な模型を作り、圧電アクチュエータによ

* 新潟工科大学 機械制御システム工学科
(〒945-1195新潟県柏崎市藤橋1719番地)
Niigata Institute of Technology

る間欠的な摺動部保持機能について剛性の観点から検討した。その結果、無給油でかつ加工時の砥石ヘッドの剛性を大きく向上し、しかも滑らかで微小な切り込み送りを得ることが確かめられたので報告する。

2. 把持機構による案内面静剛性の特性

2. 1 実験方法と実験装置

実際の平面研削盤の砥石頭とコラム案内面の構造は種々の形状があり、対称構造のみでもない。ここでは、コラムに固定される長方形断面を有する一对の垂直案内板を、砥石頭の移動側案内面が対称に前後左右から挟む一般的な垂直案内面構造を対象にした。さらに、前後から挟む案内機構のみを対象とし、これに前後方向の一方から加圧力を与えて垂直案内板を挟み込む機構を付与する。なお、一对の案内部分は対称と考えて、本実験では片方のみの模型について行った。また、模型では、実験の便宜上砥石頭の案内面を固定し、コラムの案内板を移動する構造とした。

図1は上から見た場合の実験装置の概要を示す。実際の平面研削盤を横から見た場合の砥石頭とコラムの摺動部分に対応する。概略半分の模型を鋼材で製作している。砥石頭の垂直摺動部の長さや水平方向の砥石までの突き出し長さがほぼ等しく200mmとした。固定側摺動案内板AおよびBが平面の台上にボルト締結され、移動摺動板Cを挟む。AおよびBの案内面Au、AdおよびBu、Bdの表面には、金属系無給油軸受け材料の使用を試みた。この軸受けは表面が銅、錫および鉛の合金に固体潤滑剤（主に黒鉛）を微細で均一に分散させた、厚さ1.2mmの金属系無給油軸受け材料で、裏金が鋼板である複層型で、市販品を使用している。通常多用されるターカイトに比べて材料強度が高く高荷重に耐えられる。摺動板Bに装着した2つの圧電素子（以下PZTと呼ぶ）は同じ駆動電源からの電圧によって伸びる。実用性を考慮して、切り欠きによるヒンジ部を支点にして伸びを直角方向に曲げる構造を採用した。平行平板ばね機構を通して摺動面を移動摺動板Cに押しつける。これらの切り欠き部や平行平板ばね部はワイヤ放電加工機によって一体の鋼板から作製される。押し付け力を検出するため、摺動面AuおよびAdを平行平板ばねで支え、ばねの表面にひずみゲージを貼って動力計を作製した。押し付け力が検出できる程度になるべくばね剛性を大きくした。摺動面Au、AdおよびBu、Bdの表面は軸受け材料のため、鋼製の移動摺動板Cの摺動面に比べてより粗く、より小さな弾性率を有する。また、より大きな形状誤差を含む。そのため、

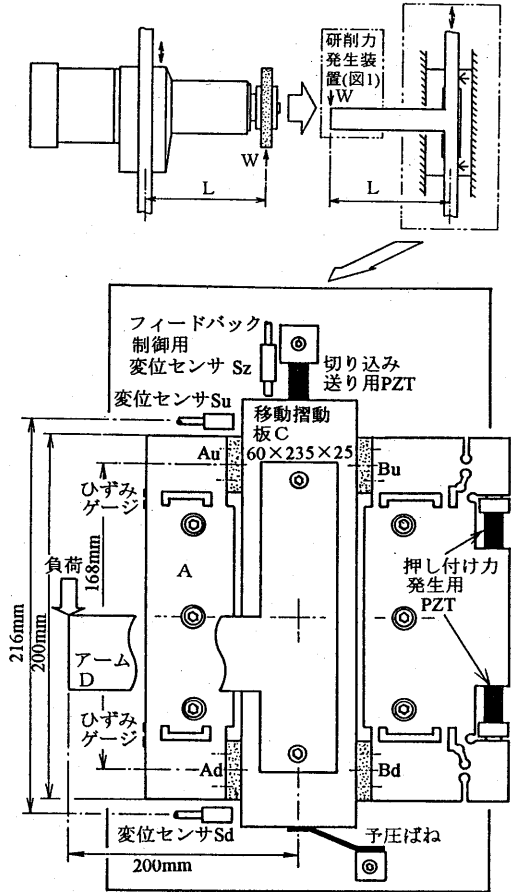


図1 摺動部把持機構の実験装置

移動摺動板Cの表面を近似的に2つの摺動面間の境界表面と見なすことにする。そこで、図1に示すように2つの非接触変位センサSuおよびSdで摺動板Cの表面の変位を測定し、摺動面Au、AdおよびBu、Bdの変位量を検出することにした。なお、移動摺動板Cに取り付けたアームDの端にばねばかりを介して負荷し、そのときのSuとSdの変位の差を得ることによって摺動部の剛性が測定できる。摺動板の厚みは25mmで、案内面の幅は20mmに設定している。これらの案内面やこれらに垂直な取り付け面(固定面)は精度良く研削仕上げしている。

2. 2 案内面静的剛性の測定と考察

まず、摺動部AおよびBの表面の変位量と押し付け力の関係を求めて摺動部の接触剛性を把握した。PZTに加える電圧を増加させて、変位センサが検出する移動摺動板Cの表面の変位量と、摺動部Aのばね部に貼付したひずみゲージからの出力による押し付け力の関係を測定

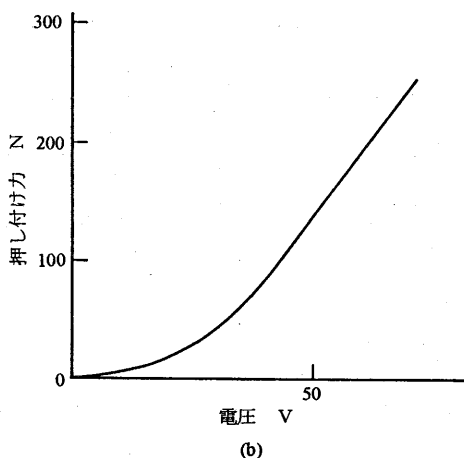
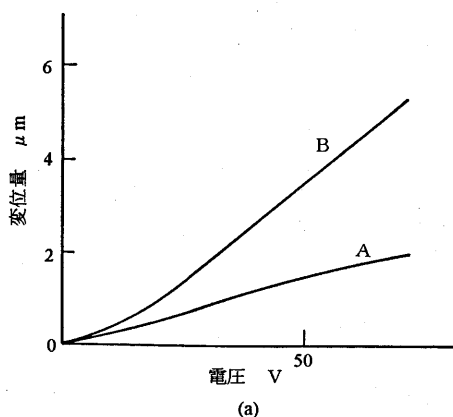


図2 PZT駆動電圧と変位および押し付け力の関係

した。図2(a)の曲線Aはセンサ Su および Sd が検出する摺動面Aの表面の変位の平均値を示す。各々の変位の相互誤差は4%以内であった。この変位の平均値を摺動面 Au および Ad の平均の縮み量と見なす。また、曲線Bは押し付け力を作用させない、自由な摺動面 Bu および Bd の表面の伸び量を示す。したがって、摺動面 Bu および Bd の表面の縮み量は曲線AとBの差と見なせる。同図(b)は電圧と押し付け力の関係を示す。これらの関係から、摺動部AおよびBの表面の縮み量と押し付け力の関係が得られる。それらの関係を図3にそれぞれ曲線AおよびBで示した。なお、同図の曲線B'は摺動面 Bu および Bd を移動摺動板Cを介して直接荷重計で押し付けた場合の測定結果を示す。BとB'はほぼ一致する。いずれも、縮み量が小さい場合には非線形性を示し、大きな縮み量になると直線的になる。縮み量が小さい場合には表面の粗さ、うねりや形状誤差による接触変形が大きく、非線形性を示し、縮み量が大きくなると平行平板ばねやヒンジ部、PZT 等

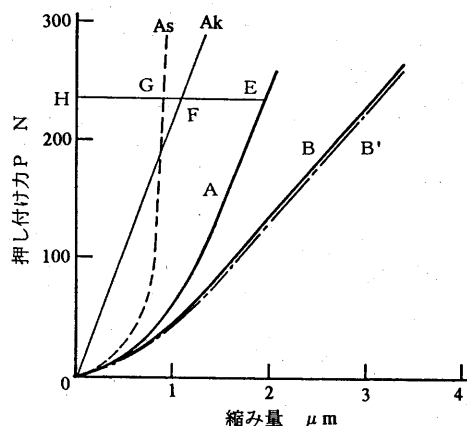


図3 縮み量と押し付け力の関係

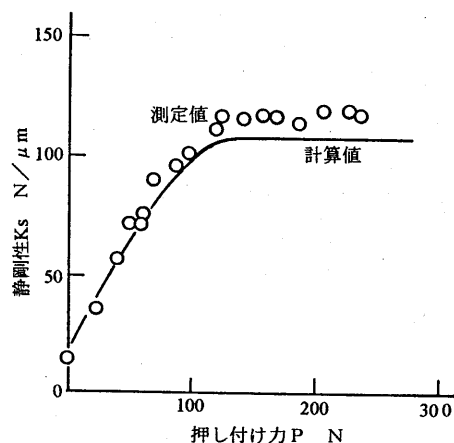


図4 把持力と静剛性の関係

のばねによる線形性が支配的になる。この縮み量と押し付け力の非線形性の関係は、一般に押し付け力の増加に伴って摺動部の剛性を向上させる⁹⁾。

次に、押し付け力を変化させたときの摺動部の静的剛性を測定した。図1に示す摺動部のアームDの端(距離200mm)に29 Nの荷重を負荷し、センサ Su および Sd が検出する変位の差を測定して、荷重点位置における静的ばね定数を算出し、これを静的剛性値と定義する。図4に測定結果を○印で示す。同図には、後述による計算結果を合わせて示している。押し付け力がある値を越すと剛性値はほぼ一定になるが、それまでは押し付け力の増大に伴い剛性が増大する。押し付け力がない場合に比べて約8倍程度剛性が向上することが分かる。この剛性は、

図5に示すような左右異なる非線形のばねによって支持される単純化した模型にもとづいて、図3の縮み量と押し付け力の関係を用いて推定できる。ある押し付け力におけるばね定数は、縮み量と押し付け力の曲線の接線の傾きである。図5において、各々のばね定数をそれぞれKおよびkとし、押し付け力の作用する距離を l 、アームの端までの距離を L とすると、アームの端に加えられる負荷によって、Kおよびkの変化の割合が無視できる場合の剛性 K_s は式(1)で表せる。

$$K_s = W / \delta w = (K + k) l^2 / (2L^2) \text{---(1)}$$

図4に示す実線は、摺動面 Au、Ad および Bu、Bd の中心間距離を l とし、図5の曲線の接線の傾きを用いて式(1)により、算出した剛性の計算結果である。測定結果と計算結果は大略一致する。

図3における曲線の接線の傾きを大きくすることにより、押し付け力一定のもとで、さらに静的剛性を上げることができる。摺動部Bについては、PZT と平行平板ばねの剛性が支配的であるため、本実験装置の剛性より大きく上げことは困難である。摺動部Aを、動力計のための平行平板ばね部を設けずに剛体的に接触させれば、全体の剛性を上げることが可能である。摺動部Aの平行平板ばね部のみの変形を測定した結果は、図3に細線 Ak で示すようにほぼ直線となる。したがって、図3において、曲線Aの縮み量から Ak のそれを差し引いた図示の点線で示す曲線 ($HG=HE-HF$ なる曲線) が摺動面 Au および Ad の接触表面の変形挙動と見なし得る。例えばG点における接線の傾きと式(1)から、この場合の摺動部剛性は極めて大きくなることが推定できる。なお、圧電アクチュエータの伸びが微小に変化しても押し付け力が大きく変わるため、後述するように、実際の安定な把持力を与えるためには押し付け力検出によるフィードバック制御が必要と思われる。したがって、この場合は摺動部Bに押し付け力検出機能を付与することが望まれる。

3. 研削加工サイクルにおける把持機構の検討

3. 1 実験装置と実験方法

把持機構により摺動部の静的な剛性向上が得られることが明らかになったが、実際の工作機械に適用するためには、研削加工サイクルの中で、繰り返し、研削力に対して把持し、切り込み動作に対応して俊敏で滑らかに作動することが要求される。そこで、研削力の負荷や切り込み動作を含む擬似的な研削加工サイクルを出現させ、その中で提案する把持機構を作動させ、その機能について検

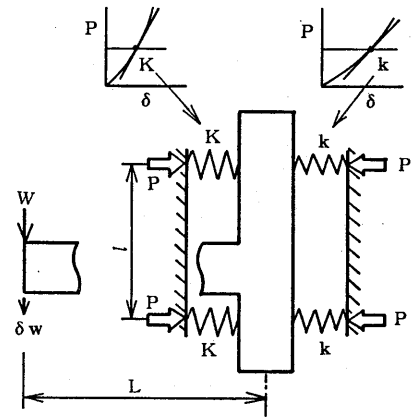


図5 把持機構のばね模型

討した。そのために実際の一般的な研削サイクルの測定例に基づいてシミュレータを作製した。図6中の上の図は、テーブル移動距離あるいは時間とテーブル速度の関係である。代表的な平面研削盤を使用して、テーブル速度と往復反転サイクル速度を極力大きくして測定した結果を示している。この一方向のストローク中の動作に基づいて、図6中の下図に示すようにレバースイッチ、PZT、切り込み送りおよび研削力付与の各々の動作の時間を設定した。この一連の動作を図7に示す装置で与える。モータ軸に取り付けた1つのカムでスイッチを作動させて矩形波を作る。矩形波で作動させることは PZT にも摺動部にも好ましくないため、時定数5 msec 程度の CR 回路で台形波に近似させ、この電圧波形で PZT を駆動させる。別のカムで

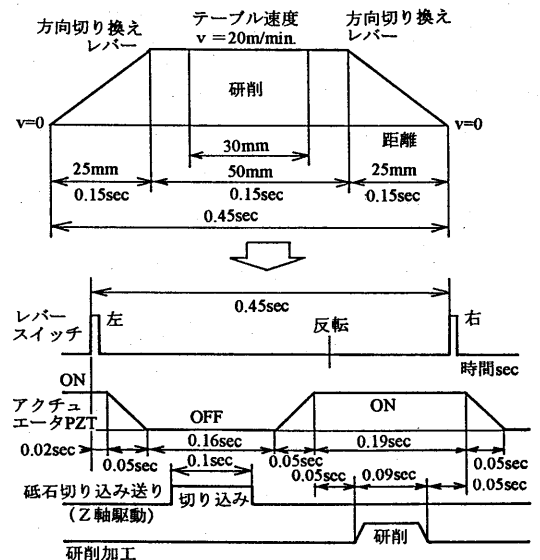


図6 研削加工サイクルの時間グラフ

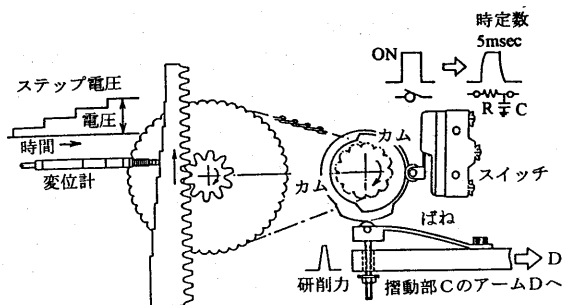
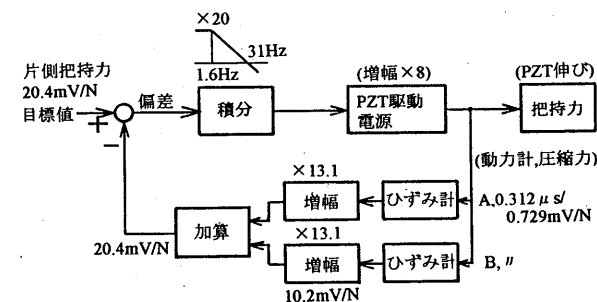


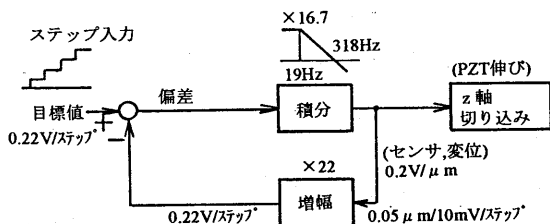
図7 研削加工サイクル模擬実験装置

図1の移動摺動板Cに固定したアームの端に疑似研削力を作用させる。図7に示すように、ばね付きのレバーの先端のローラーをカムが押すことで、一定の疑似研削力を作作用させる。また、これらと同期させてラックピニオンを動かし、変位計でステップ状の電圧波形を取り出す。この電圧波形で図1に示す移動摺動板Cの上部に設定する PZT を駆動して切り込み送りを与える。

PZT の微小な伸びで安定した把持力を引き出すためには、オープンループでの駆動は困難である。図8(a)に示すように、押し付け力が一定になるよう積分要素による簡単なフィードバック制御を採用した。その結果、目標とする電圧波形に一致する把持力を与えることができる。図9は目標とする入力電圧波形と、動力計からのほぼ同じ波形の電圧出力の測定例を示す。また、PZT の伸びは電圧に



(a) 把持力フィードバック制御



(b) z 軸微動切り込みフィードバック制御

図8 把持力と切り込み送りのブロック線図

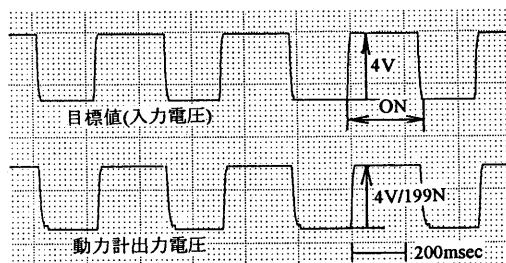


図9 フィードバック制御による押し付け力

対して非線形でヒステリシスを含む。そのため、同様に、図1に示す移動摺動板Cの上部に設置する変位計 Sz の出力をフィードバックして、図 8(b)に示す制御を行っている。

3. 2実験結果と考察

図10にシミュレータによる測定結果を示す。同図(a)は把持機構を機能させる場合の時間推移に伴うセンサ Su と Sd の出力の差、動力計による把持力の電圧出力および切り込み送りの変位出力の測定結果を示す。測定結果の

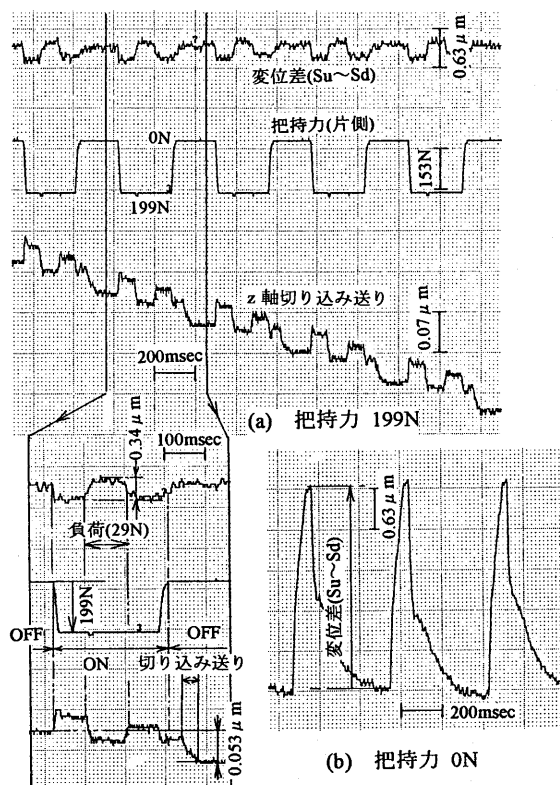


図10 研削加工サイクル模擬実験

一部について、1ストローク分の研削加工サイクルの時間軸を倍に拡大して下方に合わせて示す。1ストローク当たりのz軸方向切り込み送り量を $0.05 \mu\text{m}$ に設定している。時間軸を拡大した部分に着目すると、把持力が ON の間で負荷(疑似研削力 29N)が加わる前後、および把持力が ON から OFF になる間でz方向に若干の変位のずれが生じている。この変位のずれは、負荷が衝撃的に加わるためと予想され、把持力を大きくすることによって減少する可能性がある。しかし、1ストローク当たりのz軸切り込み送りはほぼ目標値通りに与えられていることが分かる。したがって、摺動部の表面どおしが加圧されることによって生じる凝着あるいは吸着の心配はなさそうである。また、負荷が作用しても変位差($S_u \sim S_d$)は $0.34 \mu\text{m}$ で極めて小さいことが分かる。

一方、把持機能を働かせない場合は、z軸方向の位置は負荷(疑似研削力)によって全く保持出来ない。そのため、変位差のみを図10(b)に示す。同図(a)のそれに比べて、極めて大きいことが分かる。したがって、把持機能を作ることによって、研削加工時の摺動部の剛性向上のみならずz軸方向の保持機能も期待出来る。

4. 結論

平面研削盤における砥石切り込み送り方向の垂直摺動部の剛性向上を目的として、間欠的に摺動部を把持する機構を提案し、静的および研削サイクルに沿った繰り返しの把持機能について検討して以下の結論を得た。

- (1)押し付け力(把持力)を大きくすることにより、摺動部の静的な剛性を向上することが出来る。静剛性は、摺動部表面の縮み量と押し付け力の関係を用いて推定できる。
- (2)提案する把持機構は実際の研削加工サイクルに対応する間欠的な動作においても、良く追従する。把持力が作用すると摺動部の剛性と切り込み方向の保持力を向上する。解除すれば微少な切り込み送りを与えることができる。

なお、実際の研削盤に適用するためには、電氣的なシーケンス回路の検討が必要であり、今後さらに、進める予定である。

参考文献

- 1) 小泉孝一:工作機械の垂直案内運動機構(第1報)－複合案内方式による結合特性の改善, 精密工学会誌, 59, 5,(1993)809.
- 2) 小泉孝一:工作機械の垂直案内運動機構(第2報)－複合案内方式による案内運動精度の改善, 精密工学会誌, 60,9,(1994)1279.
- 3) 李和樹:研削加工基礎学最前線Ⅱ 研削動力学, 砥粒加工学会誌, 33,4,(1989)2.
- 4) 内野研二:圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版, 東京 (1986)P.103
- 5) 古川勇二, 水兼正博, 塩崎進, 飯田博張, 佐藤真:荷重によらず摩擦力一定な空気半浮上すべり面の設計法, 精密機械, 47,2,(1981)204.